



*Universidade Federal da Paraíba*

*Centro de Tecnologia*

*Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica*

*- Mestrado - Doutorado*

**ANÁLISE DO DESEMPENHO E EMISSÕES DE UM MOTOR DE  
IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO UTILIZANDO VÁRIAS  
PROPORÇÕES DE BIODIESEL**

por

Ludmila Martins de Araújo

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade  
Federal da Paraíba para obtenção do grau de Mestre.*

**João Pessoa, Paraíba**

**Janeiro, 2019**

**LUDMILA MARTINS DE ARAÚJO**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO E EMISSÕES DE UM  
MOTOR DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO  
UTILIZANDO VÁRIAS PROPORÇÕES DE BIODIESEL**

*Dissertação de Mestrado  
apresentada ao Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Mecânica  
da Universidade Federal da Paraíba,  
em cumprimento às exigências para  
obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica.*

***Orientador: Profº Dr. Carlos Antônio Cabral dos  
Santos***

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

A663a Araujo, Ludmila Martins de.

ANÁLISE DO DESEMPENHO E EMISSÕES DE UM MOTOR DE IGNIÇÃO  
POR COMPRESSÃO UTILIZANDO VÁRIAS PROPORÇÕES DE  
BIODIESEL / Ludmila Martins de Araujo. - João Pessoa,  
2019.

47 f. : il.

Orientação: Carlos Antônio Cabral dos Santos.  
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Motores do ciclo diesel. 2. Biodiesel. 3.  
Dinamômetro. 4. Emissões. 5. Análise de desempenho. I.  
Santos, Carlos Antônio Cabral dos. II. Título.

UFPB/BC

**ANÁLISE DO DESEMPENHO E EMISSÕES DE UM  
MOTOR DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO UTILIZANDO  
VÁRIAS PROPORÇÕES DE BIODIESEL**  
por

**LUDMILA MARTINS DE ARAÚJO**

*Dissertação aprovada em 31 de janeiro de 2019*

  
**Prof. Dr. CARLOS ANTONIO CABRAL DOS SANTOS**  
*Orientador – UFPB*

  
**Prof. Dr. ABEL CAVALCANTE LIMA FILHO**  
*Examinador Interno - UFPB*

  
**Prof. Dr. JACQUES CÉSAR DOS SANTOS**  
*Examinador Externo – UFPB*

À Ana, Rejane e Albert.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que compõem o PPGEM e que, de alguma forma, contribuíram para conclusão deste trabalho ou para meu crescimento pessoal e profissional durante o tempo que fiz parte deste Programa. Aos colegas que fiz no Laboratório de Inovação, que lembrarei sempre com afeto. Aos professores que se dedicam verdadeiramente e fazem a diferença. Aos funcionários da Garagem da UFPB por toda atenção e disposição em ajudar.

Ao CNPq e à CAPES pelo fomento e suporte financeiro à educação, ciência e desenvolvimento deste País.

À equipe da oficina Rocket Performance por sua disponibilidade e parceria durante a realização dos testes.

Agradeço também ao professor Lesso Benedito dos Santos e aos colegas da Recogás pela convivência agradável e colaborativa dos dias de trabalho, compartilhando os desafios e sucessos dessa vida nada fácil de estudante de engenharia.

Ao meu professor e orientador Cabral, que tem um coração enorme e generoso, recebe aqueles que pode e os que não pode também, pois seu sentimento de educador é muito maior que diga qualquer razão.

Al professore Marcello Canova della Ohio State University per il supporto, l'interesse e la disponibilità ad aiutare e per tutta la conoscenza che diffondi con passione dove tu vada. Sei un insegnante unico!

Às minhas amigas, Rayssa, Julyanna, Ivana, Fernanda e Catarina, por tantas horas de conversas, conselhos e risadas que tornaram esse período mais leve.

À minha família por acreditar em minha capacidade e à minha mãe e minha irmã Ana que, além disso, me deram suporte e amor diariamente.

Ao meu querido Albert que esteve comigo em cada minuto de alegria e dificuldade que passei, sendo amoroso, verdadeiro e companheiro sempre.

# **ANÁLISE DO DESEMPENHO E EMISSÕES DE UM MOTOR DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO UTILIZANDO VÁRIAS PROPORÇÕES DE BIODIESEL**

## **RESUMO**

Atualmente, a preocupação com emissões geradas por motores de combustão interna, e em particular motores utilizando óleo diesel, é um pré-requisito ligado aos seus projetos. Busca-se cada vez mais alternativas praticáveis e que apresentem resultados significativos na redução de poluentes. A previsível escassez de petróleo aliada à consciência ecológica está levando pesquisadores a procurar novas fontes de energia e processos de combustão mais eficientes e menos poluentes. Uma das possíveis soluções para este fim é a utilização de biodiesel nos motores de combustão interna por compressão (ICE), por ser capaz de reduzir os efeitos maléficos causados pelo óleo diesel. Para isto, foram realizados testes em dinamômetro de rolo com um veículo Chevrolet S10 LT, ano e modelo 2016, totalmente original, usando-se como combustíveis óleo diesel comum S10 (que possui originalmente 10% de biodiesel), óleo diesel B15 (com 15% de biodiesel) e biodiesel B100 (100% de biodiesel). Com a finalidade de avaliar a se esta alteração é útil para atender às necessidades da sociedade e o uso em transportes urbanos de cargas e passageiros, foram medidos a opacidade, o torque máximo, a potência máxima e feita a análise dos gases de escape. Através deste estudo foi possível analisar os efeitos do aumento da concentração do biodiesel nos parâmetros citados e concluir que o uso deste combustível de fonte renovável trouxe benefícios, como a redução da opacidade e de emissões de NOx e o aumento de 7 hp na potência medida na roda.

Palavras-chave: Motores do ciclo diesel, biodiesel, dinamômetro, emissões, análise de desempenho.

# **PERFORMANCE AND EMISSIONS ANALYSIS OF A COMPRESSION IGNITION ENGINE USING VARIOUS PROPORTIONS OF BIODIESEL**

## **ABSTRACT**

The internal combustion engines' emissions, one of the biggest concern in modern days, particularly on the diesel ones, places a critical role since the design stage inside manufacturers' headquarters. The search for practical solutions that can deliver substantial performance results is becoming an industry standard. The predictable oil shortage and the global environment awareness drive researchers to non-conventional energy sources and new – and less harmful for the Earth – combustion processes. Biodiesel presents itself as one possible solution for this equation for internal combustion engines (ICE), where its main quality is to avoid diesel's critical problems. To achieve this results, tests have been made on a chassis roll dynamometer with a 2016 model year Chevrolet S10 LT truck on fully stock specifications, using common S10 diesel (that already contains 10% of biodiesel), B15 diesel (loaded with 15% biodiesel) and B100 diesel (pure biodiesel). To make sure if this alternative can fulfill the society's needs and be used on current vehicles and light trucks, several parameters were measured, such as exhaust gas opacity, peak torque and power and greenhouse gases concentration. This study made possible the analysis of biodiesel's effect on the engine, showing that this renewable energy source make substantial benefits performance-wise, being the reduction in gas opacity and NO<sub>x</sub> levels and a 7 whp increase the most notable achievements.

**Keywords:** Compression ignition engines, biodiesel, dynamometer, emissions, performance analysis.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagramas de ciclo misto (a) p-V e (b) T-S .....	16
Figura 2. Processo de produção do biodiesel através da transesterificação .....	19
Figura 3. Repartição de fontes renováveis.....	21
Figura 4. Consumo de energia nos transportes.....	22
Figura 5. Emissões de gases de efeito estufa por geração de Energia e Processos Industriais .....	22
Figura 6. Consumo de combustíveis nos transportes. ....	23
Figura 7. Emissões de gases de efeito estufa nos transportes.....	23
Figura 8. Esquema de freio dinamométrico.....	24
Figura 9. Vista em corte de um dinamômetro hidráulico. ....	25
Figura 10. Dinamômetro acoplado diretamente a um motor.....	26
Figura 11. Veículo sobre dinamômetro de rolo.....	26
Figura 12. Veículo Chevrolet S10 utilizado nos testes.....	27
Figura 13. Dimensões externas da Chevrolet S10 ano/modelo 2016.....	29
Figura 14. Opacímetro Testo 308 .....	30
Figura 15. Mancha de fuligem impressa em papel filtro .....	31
Figura 16. Analisador de gases MRU OPTMA 7.....	32
Figura 17. Sonda.....	33
Figura 18. Dinamômetro Servitec Modelo 2020RB.....	34
Figura 19. Fixação do veículo na base do dinamômetro .....	35
Figura 20. Exaustor para arrefecimento do veículo.....	35
Figura 21. Exemplo da posição do analisador e do opacímetro .....	36
Figura 22. Curvas de potência para B10, B15 e B100 .....	41
Figura 23. Curvas de potência para B10, B15 e B100 .....	43

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades do óleo diesel combustível.....	18
Tabela 2. Propriedades do biodiesel combustível .....	20
Tabela 3. Dados do motor da Chevrolet S10 ano/modelo 2016.....	28
Tabela 4. Relações de transmissão da Chevrolet S10 ano/modelo 2016.....	28
Tabela 5. Valores das dimensões externas da Chevrolet S10 ano/modelo 2016.....	29
Tabela 6. Rotações para cada condição analisada .....	38
Tabela 7. Resultados de opacidade dos gases de escape .....	39
Tabela 8. Percentual de CO <sub>2</sub> presente nos gases de escape.....	39
Tabela 9. Concentração de NO, NO <sub>2</sub> e NO <sub>x</sub> nos gases de escape .....	40
Tabela 10. Resultados de potência máxima para B10, B15 e B100.....	42
Tabela 11. Resultados de torque máximo para B10, B15 e B100 .....	42

# SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	11
1. INTRODUÇÃO .....	11
1.1. Objetivo Geral .....	13
1.2. Objetivos Específicos .....	13
1.3. Justificativa .....	13
1.4. Estrutura da Dissertação.....	14
CAPÍTULO II .....	15
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	15
2.1. Introdução .....	15
2.2. Ciclo Diesel.....	15
2.3. Óleo diesel.....	17
2.4. Biodiesel.....	18
2.5. Balanço Energético Nacional .....	20
2.6. Tipos de Dinamômetro.....	24
2.6.1. Dinamômetro Hidráulico.....	25
2.6.2. Dinamômetro de Inércia.....	25
CAPÍTULO III .....	27
3. EXPERIMENTAÇÃO .....	27
3.1. Introdução .....	27
3.2. Equipamentos .....	27
3.2.1. Veículo e Motor .....	27
3.2.2. Bomba de Opacidade Digital .....	29
3.2.3. Analisador de Gases .....	31
3.2.4. Dinamômetro Inercial de Rolo.....	33
3.3. Descrição dos Testes Realizados.....	34
CAPÍTULO IV .....	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	39
4.1. Introdução .....	39
4.2. Gases de Exaustão.....	38
4.2.1. Opacidade.....	38
4.2.2. Análise da Composição dos Gases.....	39
4.3. Desempenho.....	40
4.3.1. Potência Máxima.....	40
4.3.2. Torque Máximo.....	42
CAPÍTULO V .....	45
5. CONCLUSÕES.....	45
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	45
REFERÊNCIAS .....	47

# CAPITULO I

## 1. INTRODUÇÃO

Motores de combustão interna de ignição por compressão (ICO) são utilizados como fonte de potência, sendo indicados não apenas para promover a locomoção, mas também de forma estacionária aplicando sua rotação na movimentação de eixos de máquinas industriais e de geradores de energia elétrica. Atualmente, a preocupação com as emissões geradas por esse e outros tipos de motores é um pré-requisito ligado ao seu projeto e motivo para constantes pesquisas, buscando-se cada vez mais alternativas viáveis que apresentem resultados significativos.

Segundo Demirbas (2008), a maior parte da energia que é utilizada nos dias de hoje vem de fontes fósseis como petróleo, carvão e gás natural. Apesar destas fontes estarem sendo produzidas continuamente pela natureza, o ritmo de consumo é maior que a produção, transformando este em um recurso finito, especialmente o petróleo. Por volta de 2040, cerca de metade do suprimento de energia virá de fontes renováveis. Assim, a previsível escassez dos combustíveis fósseis é uma razão para que sejam feitos estudos sobre fontes alternativas de combustíveis para este fim.

Devido à queima incompleta do combustível em motores ICO, ocorre a formação de resíduos poluentes (NO<sub>x</sub>) que são expelidos no processo de exaustão. A eliminação dos NO<sub>x</sub> através da reação com o oxigênio no escape (excesso de ar) é difícil e o rendimento dos catalisadores em motores deste tipo é menor, se comparado aos motores do ciclo Otto, tornando a emissão deste poluente um problema.

Para reduzir as emissões e atender às normas vigentes, existem alternativas como turbocompressores, sistema de recirculação de gases de exaustão, controle do tempo de abertura das válvulas de admissão e exaustão, sistema de redução catalítica seletiva, uso do ciclo dual e otolização de motores ICO. Porém, com a atualização de porcentagem de biodiesel no diesel comum e mudanças nas legislações sobre emissões, será necessário um esforço maior e constante para reduzir os efeitos dos poluentes.

Até primeiro de janeiro de 2023 entrará em vigor no Brasil o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores fase 8, o Proconve P8. Esta nova fase segue os padrões da norma europeia Euro 6, em vigor na Europa desde 2013, e que permite cerca de 80% menos emissões que a Euro 5, na qual se baseia o Proconve P7 atualmente em vigor no Brasil. O Proconve P8 será regulado pela Resolução 490/2018

do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama), que dispõe sobre controle de emissões de gases poluentes e de ruídos para veículos automotores pesados novos. Outro fator regulatório a ser levado em consideração é a Resolução 16/2018 do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), que estabelece a adição gradual de 15% de biodiesel ao diesel comum para até 2023.

A adoção do ciclo dual através da conversão de motores ICO em motores bicom bustíveis (dual-fuel) através da inserção de GNV (gás natural veicular) como combustível principal e o biodiesel como secundário, capazes de reduzir os efeitos maléfic os causados pelo óleo diesel, é uma alternativa já utilizada e com resultados comprovados (Santos, 2016).

Outra opção de solução é a ottolização, que exige alterações consideráveis no motor ICO e se dá pela substituição completa do óleo diesel pelo GNV. Assim, o motor deixa de trabalhar sob o ciclo Diesel e passa a operar sob o ciclo Otto. Essas mudanças se devem ao fato do motor a GNV trabalhar a uma taxa de compressão mais baixa, comparativamente ao motor original. A bomba injetora assim como os bicos injetores devem ser retirados e deve ser feita a troca e/ou usinagem de peças como o eixo de comando de válvulas, pistões e cabeçotes. Faz-se necessária também a instalação de um sistema de ignição com velas próprias para o GNV. Portanto, o motor deixa de trabalhar com ignição por compressão e começa a trabalhar com ignição por centelha, daí a denominação ottolização (Gutiérrez, 2011).

Visando uma solução mais rápida, que não necessitasse de modificações no motor ou no veículo e que atendes se à legislação sobre poluentes e à exigência da adição de biodiesel no óleo diesel, foi analisado o uso de biodiesel em maior proporção no óleo diesel e de biodiesel puro. Para isto, realizaram-se testes com três combustíveis: diesel comum, com 10% de biodiesel (B10), para servir de base para comparação; diesel puro com adição de 15% de biodiesel (B15), com o intuito de avaliar os efeitos do aumento da porcentagem de biodiesel proposto pela Resolução 16/2018 do CNPE; e biodiesel puro (B100) para analisar a possibilidade de uso deste combustível sem a necessidade do óleo diesel.

Nos testes com cada combustível em um veículo no dinamômetro de rolo foram medidos torque e potência máximos e, nas rotações em que isto ocorreu e na rotação de marcha lenta, foram feitas medições de opacidade e composição dos gases de exaustão.

Ao falar sobre redução de emissões, deve-se lembrar também a importância deste tipo de pesquisa para o bem-estar da população e não apenas como uma atualização

tecnológica mandatória. Com a implantação do Proconve P8, haverá uma redução de até (99%) das emissões como particulados. Esta será uma grande contribuição para a qualidade de vida dos brasileiros, visto que poderá reduzir os riscos de doenças cardíacas, câncer de pulmão e acidentes vasculares e, com isso, os custos com assistência médica (MMA, 2018).

### **1.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é a avaliação dos efeitos da utilização do biodiesel tanto em mistura com o diesel comum quanto puro em um motor específico de ignição por compressão e, a partir dos resultados obtidos em testes em dinamômetro de rolo, concluir se é possível utilizar o biodiesel em maiores proporções neste tipo de motor.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- 1 - Avaliação da potência máxima e do torque máximo do motor de um veículo Chevrolet S10 de ignição por compressão utilizando variadas concentrações de biodiesel e biodiesel puro;
- 2 - Avaliação dos gases de emissão do motor citado tanto em relação à opacidade quanto em relação à composição quando utiliza variadas concentrações de biodiesel e biodiesel puro.
- 3 - Avaliação da utilização de variadas concentrações de biodiesel e biodiesel puro para o transporte de cargas e passageiros.

### **1.3. Justificativa**

Justifica-se a importância deste trabalho por ser uma análise da eficácia do uso de óleo diesel adicionado de 15% de biodiesel e de biodiesel puro, visto que é necessário certificar que não há perdas no desempenho do motor (potência e torque máximos) e que há redução de poluentes utilizando tais combustíveis. Sendo comprovado que a alternativa é viável, este trabalho pode ser usado como fonte de dados para a comprovação que se deseja obter para a adição de até 15% de biodiesel no óleo diesel, bem como comprovará que o biodiesel puro pode de fato ser empregado como combustível em automóveis, trazendo benefícios à sociedade e contribuindo para a solução do problema do fim dos combustíveis derivados de petróleo.

#### **1.4. Estrutura da Dissertação**

A presente dissertação está estruturada em 5 (cinco) capítulos. O Capítulo I apresenta a introdução, o objetivo geral, o objetivo específico e a justificativa para a elaboração deste trabalho.

No Capítulo II é feita a fundamentação teórica abordando conceitos importantes para o entendimento e desenvolvimento do trabalho.

O Capítulo III fala sobre os equipamentos que foram utilizados além da metodologia empregada na realização dos testes.

Os efeitos dos variados combustíveis na potência máxima e torque máximo, bem como a análise da opacidade e concentração de gases de exaustão do motor são mostrados no Capítulo IV.

O Capítulo V apresenta as conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

Por último, são listadas as referências consultadas para elaboração do trabalho.

## **CAPÍTULO II**

### **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

#### **2.1 Introdução**

O presente capítulo traz conceitos importantes para compreensão do tema abordado neste trabalho, como o funcionamento de um motor de ignição por compressão e seu ciclo, os combustíveis testados, dados sobre matriz energética brasileira e tipos de dinamômetro.

#### **2.2 Ciclos de Diesel**

Existem vários ciclos de funcionamento de motores de combustão interna, sendo mais comumente nos veículos o ciclo Otto e o ciclo Diesel, que será detalhado abaixo.

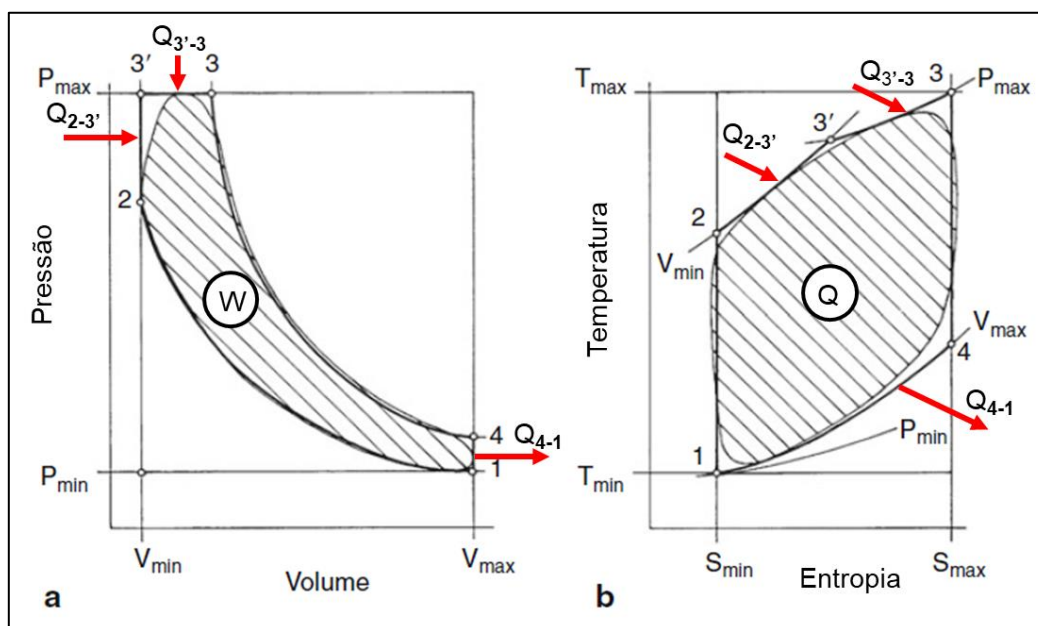
No ciclo Otto, o motor apresenta quatro tempos de funcionamento que, de forma simplificada, são: admissão, no qual ocorre a abertura da válvula de admissão e ar podendo estar ou não já misturado com o combustível entra no cilindro; compressão, em que a mistura de ar e combustível é comprimida do ponto morto inferior (PMI) até o ponto morto superior (PMS) sendo aquecida pela compressão; ignição, tempo no qual ocorre a centelha através da vela e a mistura comprimida entra em combustão, empurrando o pistão até o ponto morto inferior e gerando torque e potência; e exaustão, quando o pistão volta ao ponto morto superior e os produtos da combustão, incluído combustível não queimado, são expelidos pela válvula de exaustão. Por necessitar da centelha da vela, motores deste tipo de ciclo também recebem o nome de “motores de ignição por centelha”.

Motores do ciclo Diesel têm funcionamento semelhante aos de ciclo Otto, com exceção do tempo de ignição e de que na admissão apenas ar entra no cilindro. O fornecimento de calor ocorre à pressão constante quando há a injeção de combustível na parte inicial da descida do pistão para o PMI. Com isto, ocorre a autoignição do combustível ao ser injetado e entrar em contato com o ar comprimido e a alta temperatura (Brunetti, 2013). Neste tipo de ciclo a taxa de compressão é bem mais elevada do que no ciclo Otto, já que é necessário que o ar admitido seja comprimido o suficiente para que se atinja uma temperatura alta o bastante para fazer o combustível injetado entrar em ignição justificando a nomenclatura de “motores de ignição por compressão”.



Segundo para um motor alternativo de ignição por compressão, o ciclo ideal se torna um ciclo real quando é ajustado para a realidade. Isto é, ambos ocorrem entre limites especificados semelhantes de volume ( $V_{max}$  e  $V_{min}$ ) e pressão ( $p_{max}$  e  $p_{min}$ ). Além destes limites, a taxa de compressão e o calor de entrada devem ser equivalentes.

Como a injeção de combustível em motores de ignição por compressão é estratificada e as gotículas de combustível não entram em combustão todas ao mesmo tempo, é utilizado o ciclo misto para descrever este tipo de motor (Martins, 2016). A Figura 1 mostra os diagramas de pressão (p) em função do volume (V) e da temperatura (T) em função da entropia (S) do ciclo misto. A área hachurada corresponde ao ciclo real e a diferença desta em relação à área do ciclo real se deve às perdas por atrito e por transferência de calor nas paredes dos cilindros.



**Figura 1.** Diagramas de ciclo misto (a) p-V e (b) T-S (adaptado de Mollenhauer, 2010).

As fases do ciclo misto mostrado acima podem ser descritas da seguinte forma (MARTINS, 2016):

1-2 Adiabática: compressão do ar com utilização de trabalho e aumento da energia interna;

2-3' Isovolumétrica: combustão instantânea da mistura ar-combustível no PMS;

3'-3 Isobárica: queima do restante do combustível durante o aumento de volume e fornecimento de calor à pressão constante;

3-4 Adiabática: expansão do fluido com utilização de sua energia interna para realização de trabalho (área limitada superiormente pela linha 3-4);

4-1 Isovolumétrica: exaustão dos produtos da combustão com perda de calor.

## **2.3 Óleo diesel**

O óleo diesel utilizado em veículos de linha leve e pesada, geradores, embarcações, locomotivas e em equipamentos industriais é um combustível fóssil produzido a partir da destilação fracionada do petróleo. O diesel é formado por uma longa cadeia de hidrocarbonetos com temperaturas de ebulição variando entre 180 °C e 360 °C, além de oxigênio, nitrogênio e enxofre em quantidades menores.

Esse combustível passou a ser utilizado em motores de ignição por compressão quando Rudolf Diesel percebeu que a gasolina seria imprópria devido à sua baixa resistência à autoignição. O óleo diesel, por sua vez, proporcionava mais estabilidade, visto que é capaz de suportar taxas de compressão mais elevadas.

Atualmente, o óleo diesel comercializado para o consumidor final, recebe obrigatoriamente a adição de 10% de biodiesel e é o combustível mais utilizado no Brasil, devido ao grande volume consumido em transportes rodoviários. Até novembro de 2018, foram vendidos por distribuidoras 51.237.053 m<sup>3</sup> de óleo diesel (ANP, 2019).

A dessulfurização do óleo diesel é um processo importante, pois, dependendo de sua origem, o óleo cru pode conter variadas quantidades de enxofre quimicamente ligado. Concentrações entre 0,1% e 3% são comuns (Mollenhauer, 2010). Para obter óleo diesel com baixa concentração de enxofre, como o diesel S10 (com 10 ppm de enxofre) é necessário que a dessulfurização seja extremamente eficiente.

O diesel S10 e o S500 (500 ppm de enxofre) são comercializados em postos de abastecimento para uso rodoviário, sendo este último permitido apenas para veículos fabricados a partir de até 31 de dezembro de 2011. Existem ainda o S1800 (1800 ppm de enxofre) para uso em mineração, transporte ferroviário e geração de energia elétrica (outorgado pela ANEEL como produtor independente de energia ou serviço público), e o Óleo diesel marítimo DMA/DMB para embarcações.

O diesel S10 comum possui índice de cetano 48 (Petrobrás, 2019). De acordo com Martins (2016), este é um valor que representa a facilidade do combustível em auto-inflamar-se e sua medição se dá em um ensaio padronizado com um motor de taxa de compressão variável, a 900 rpm, temperatura de funcionamento de 100°C e ar de admissão a 65,5°C. A injeção é feita com um avanço de 13° e a taxa de compressão é

alterada até que a autoignição ocorra no PMS, definindo assim o índice de cetano (porcentagem em volume de cetano de uma mistura deste composto com naftaleno que apresente o mesmo atraso de ignição). Um índice de cetano acima de 50 é desejável, pois proporcional o funcionamento suave do motor e reduz as emissões. Porém, valores muito acima deste causam redução do poder calorífico do combustível e, conseqüentemente, o aumento do consumo.

A Tabela 1 traz propriedades importantes do óleo diesel, no que diz respeito às suas características que devem ser consideradas por tratar-se de um combustível.

<b>Ponto de fulgor</b>	38°C
<b>Massa específica (a 20°C)</b>	815 a 853 kg/m <sup>3</sup>
<b>Viscosidade cinemática</b>	2 a 4,5 mm <sup>2</sup> /s
<b>Poder calorífico inferior</b>	36 MJ/L

**Tabela 1.** Propriedades do óleo diesel combustível (Martins, 2016).

## 2.4 Biodiesel

Biodiesel é um combustível derivado de óleos naturais que pode ser utilizado em substituição ao óleo diesel em motores de ignição por compressão. Este nome é dado a uma variedade de combustíveis oxigenados com base em éster vindos de fontes que renováveis que podem ser feitos a partir de óleos e gorduras orgânicos processados (Demirbas, 2008).

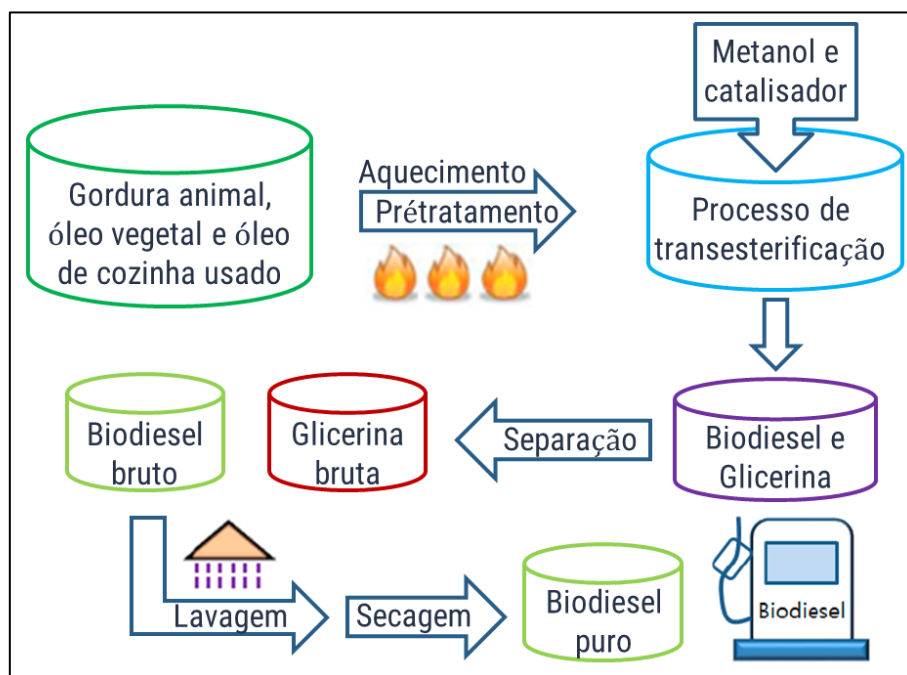
Zuninga (2011) relata que a matéria-prima para produção do biodiesel depende principalmente de fatores geográficos, podendo ser óleos vegetais (soja, caroço de algodão, palma, mamona, amendoim, canola, girassol açafraão, coco, etc.), gorduras de origem animal e óleos de descarte (óleos usados em frituras, por ex.).

De acordo com Wang et al. (2007), para que o biodiesel seja produzido, óleos vegetais e gorduras animais são submetidos a uma reação química denominada transesterificação em que a matéria-prima reage na presença de um catalisador com um álcool, geralmente é utilizado o metanol por ter menor custo. Outros álcoois como etanol ou iso-propanol podem ser utilizados para produzir biodiesel de qualidade superior. O resultado da transesterificação é uma molécula de glicerina e três de biodiesel.

Através da decantação, a glicerina é separada do biodiesel que é purificado e filtrado. Geralmente, cada 100kg de óleo reagem com 10kg de álcool, dando origem a

aproximadamente 100kg de biodiesel e 10kg de glicerina. A glicerina pode ser utilizada por indústrias de cosméticos, alimentícia e farmacêutica. Existem pesquisas sendo realizadas no Núcleo de Pesquisa e Extensão de Combustíveis e de Materiais (LACOM) da UFPB para melhor aproveitamento da glicerina.

O processo da produção do biodiesel pode ser visto na Figura 2.



**Figura 2.** Processo de produção do biodiesel através da transesterificação (Autora, 2018).

No Brasil, o biodiesel não é comercializado puro e é possível apenas encontra-lo misturado ao óleo diesel comum. Para designar a concentração de biodiesel em uma mistura, utiliza-se a letra B (do inglês “blend”) seguido de um número que indica a porcentagem de biodiesel presente. Assim, B10 significa que o combustível possui 10% de biodiesel e 90% de óleo diesel, B15 indica 15% de biodiesel e 85% de óleo diesel, já B100 indica que o combustível é composto 100% de biodiesel.

Como o biodiesel não é vendido ao consumidor final, a ANP disponibiliza a quantidade total produzida no país, que é um dos maiores produtores mundiais, até dezembro de 2018 como sendo 5.350.036 m³.

A quantidade de oxigênio existente no biodiesel melhora o processo de combustão, devido à melhor homogeneização com o combustível durante a combustão, e diminui sua oxidação. Por esta razão, a eficiência da combustão é maior com biodiesel

que com óleo diesel, o que compensa seu poder calorífico superior (entre 39 e 41 MJ/kg) menor que o do óleo diesel (43 MJ/kg). Como o ponto de ignição do biodiesel ocorre a uma temperatura maior que a do óleo diesel, é possível utilizá-lo em motores com altas taxas de compressão, sem provocar a autoignição. Além disso, este combustível possui propriedades lubrificantes melhores que o óleo diesel contribuindo para a redução do desgaste do sistema de injeção e melhora a vida útil do motor (Demirbas, 2008).

A Tabela 2 traz propriedades do biodiesel.

<b>Ponto de fulgor</b>	100°C (mín.)
<b>Massa específica (a 20°C)</b>	850 a 900 kg/m <sup>3</sup>
<b>Viscosidade cinemática</b>	3 a 6 mm <sup>2</sup> /s
<b>Poder calorífico inferior</b>	38 MJ/L
<b>Índice de cetano (médio no Brasil)</b>	60

**Tabela 2.** Propriedades do biodiesel combustível (Demirbas, 2008).

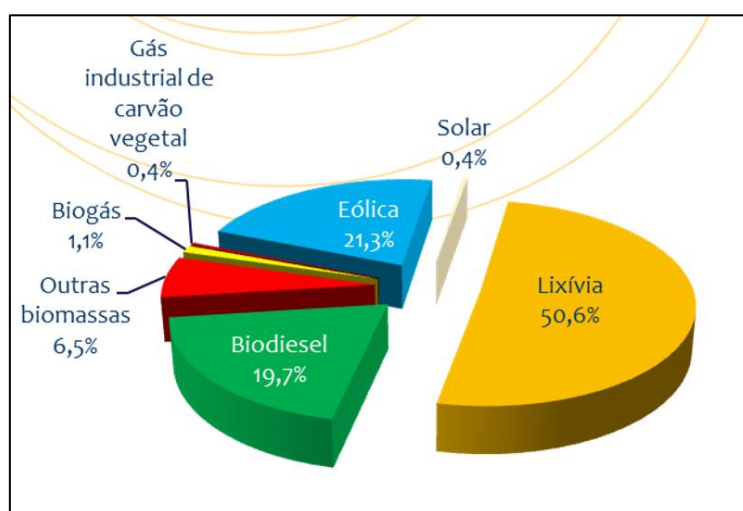
Brunetti (2013) aponta como vantagens do biodiesel: ser perfeitamente miscível ao óleo diesel, reduzir a quantidade de óxidos de carbono e particulados produzida, ter menor teor de enxofre, ter alto poder lubrificante, ser mais degradável. Já Demirbas (2008), indica que se produzido em larga escala e com uso de tecnologias, o custo de produção pode ser mais baixo do que os derivados de petróleo, a economia dos países pode passar a ser menos dependente dos produtores de petróleo, a produção de biodiesel gera empregos e renda trazendo desenvolvimento econômico e social.

## **2.5 Balanço Energético Nacional**

O Balanço Energético Nacional (BEN) é a soma de todos os tipos de fontes energéticas que foram ofertados e consumidos ao longo de um ano, contemplando as atividades de extração de recursos energéticos primários, sua conversão em formas secundárias, importação e exportação, a distribuição e o uso final da energia (EPE, 2018). O BEN serve como fonte de dados para pesquisas e para o planejamento energético do País. São consideradas fontes renováveis e não renováveis que podem ser utilizados para os mais diversos fins, por exemplo para uso industrial, doméstico, comercial e transportes.

Entre as fontes mais comuns produzidas pelo Brasil encontram-se a energia elétrica de fonte hidráulica, gasolina, óleo diesel, biodiesel, etanol, gás natural veicular e carvão mineral.

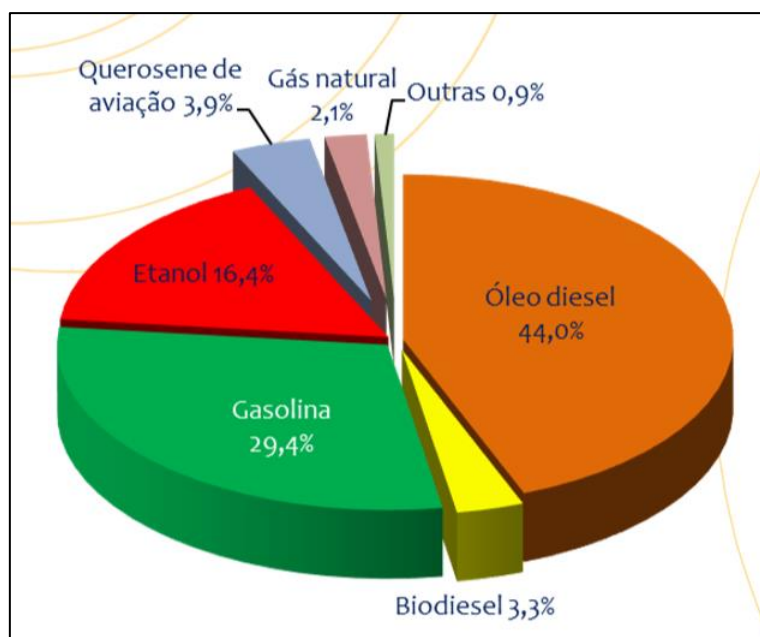
O BEN 2018 mostra informações sobre a matriz energética brasileira de 2017, tendo sido publicado em maio de 2018. De acordo com o Relatório Síntese do BEN 2018, em 2017 a participação de renováveis na Matriz Energética Brasileira foi de 42,9% e manteve-se entre as mais elevadas do mundo. O avanço do gás natural foi compensado principalmente pela eólica, lixívia e biodiesel. A Figura 3 mostra a participação das diversas fontes renováveis contabilizadas.



**Figura 3.** Repartição de fontes renováveis (EPE, 2018).

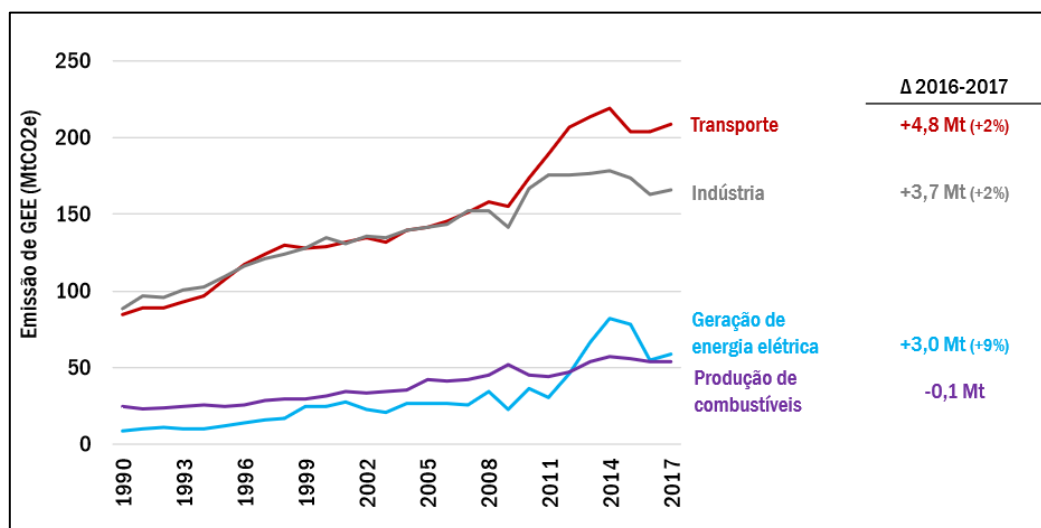
Ainda de acordo com o BEN 2018, o biodiesel teve um aumento de 11,8% na repartição de 2017 se comparada com o ano de 2016.

Em relação ao consumo de energia nos transportes no ano de 2017, a Figura 4 mostra que existe uma diferença considerável entre o consumo de óleo diesel (44%) e o consumo de outros combustíveis, entre eles o biodiesel, que ainda é utilizado apenas na mistura com o diesel.



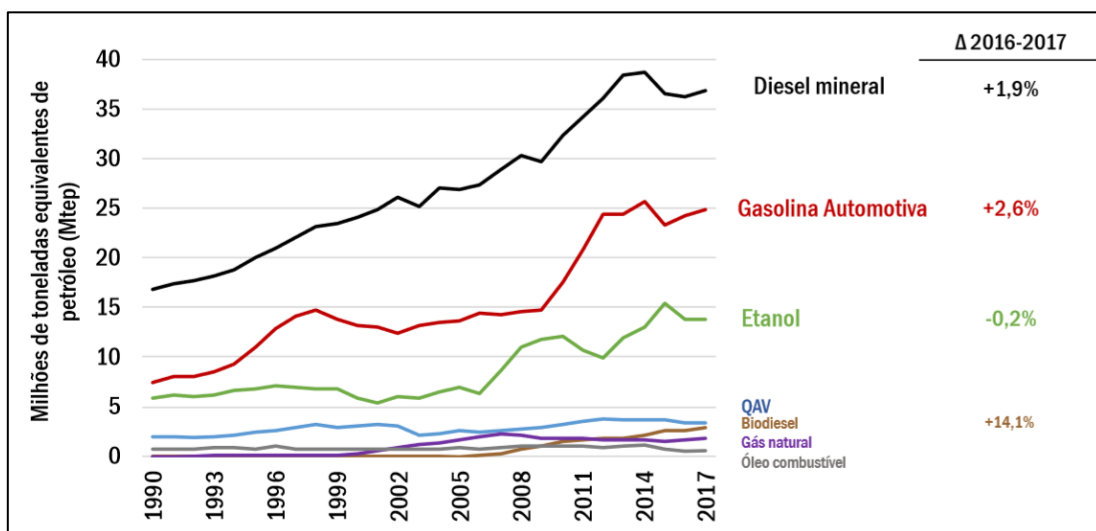
**Figura 4.** Consumo de energia nos transportes (EPE, 2018).

Em relação às emissões geradas para a produção de energia, a Figura 5 mostra que a o principal ramo de atividade responsável por geração de gases de efeito estufa (GEE) é o de transportes.



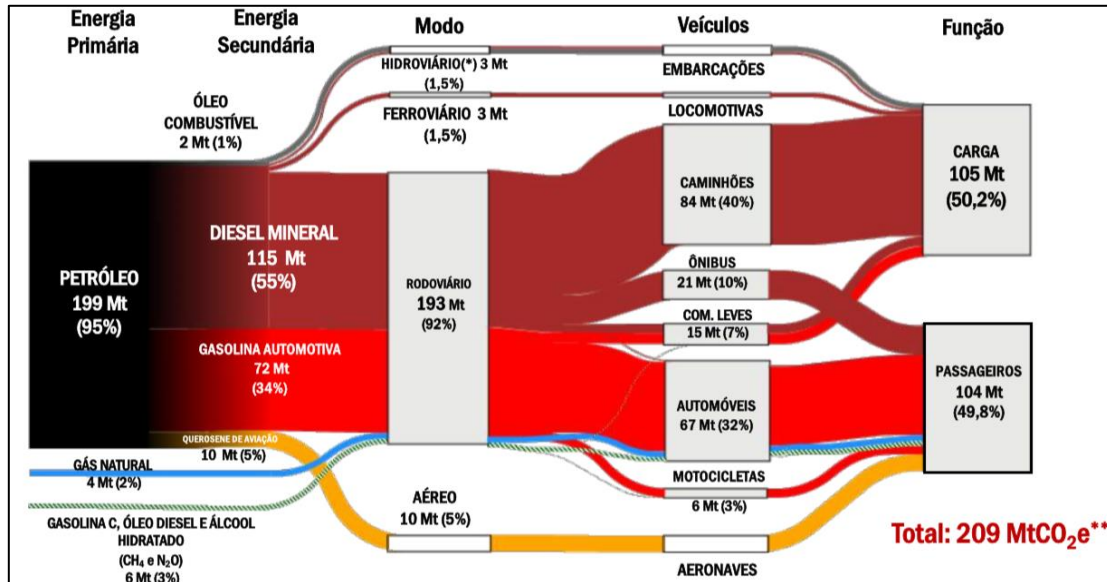
**Figura 5.** Emissões de gases de efeito estufa por geração de Energia e Processos Industriais (SEEG, 2018).

Dentre os transportes, pode ser observado na Figura 6 que o consumo de óleo diesel foi consideravelmente superior ao de outros combustíveis, superando a marca de 35 milhões de toneladas, enquanto que a segunda colocada, gasolina automotiva, atingiu cerca de 25 milhões de toneladas.



**Figura 6.** Consumo de combustíveis nos transportes (SEEG, 2018).

A Figura 7, mostra que o uso de óleo diesel representou 55% das emissões de gases de efeito estufa em 2017, se tornando este mais um motivo para a aplicação de sua redução gradual e, posteriormente, substituição por uma fonte menos prejudicial, como o biodiesel.



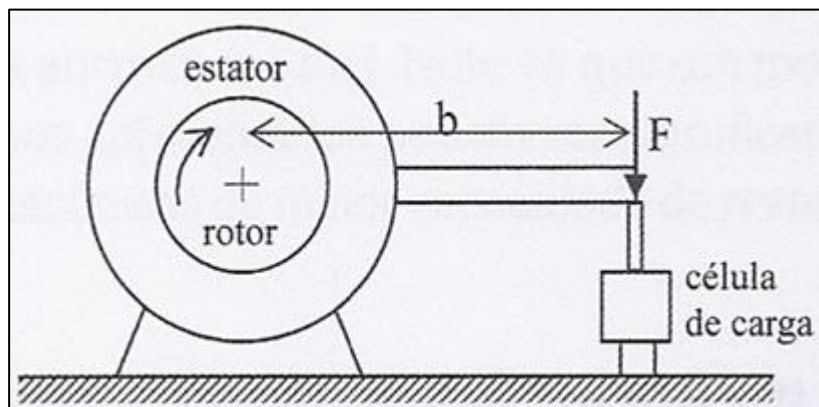
**Figura 7.** Emissões de gases de efeito estufa nos transportes (SEEG, 2018).



## 2.6 Tipos de Dinamômetro

Dinamômetros são equipamentos que podem ser utilizados para avaliação de desempenho e de funcionamento de motores elétricos e de combustão interna com o objetivo de desenvolvimento e refinamento, geralmente são tem alto custo e são reservados para aplicações específicas (Mate e Dhande, 2014). Através de diversos sensores, é possível fazer a coleta de várias informações que permitem a análise, como pressão e temperatura de admissão e exaustão, torque, potência, condições ambientes, entre outros, e todas as informações podem ser transferidas para um computador através de um software específico.

Este tipo de equipamento é uma espécie de freio que consiste em um rotor ligado ao motor e em um estator apoiado em rolamentos e “travado” em uma célula de carga colocada na extremidade de um braço de comprimento “b”, resultando uma força “F”. O resultado é um binário de valor  $b \times F$ , que multiplicado pela rotação do motor, nos dá sua potência (Martins, 2016). A Figura 8 mostra o desenho esquemático de um freio dinamométrico.



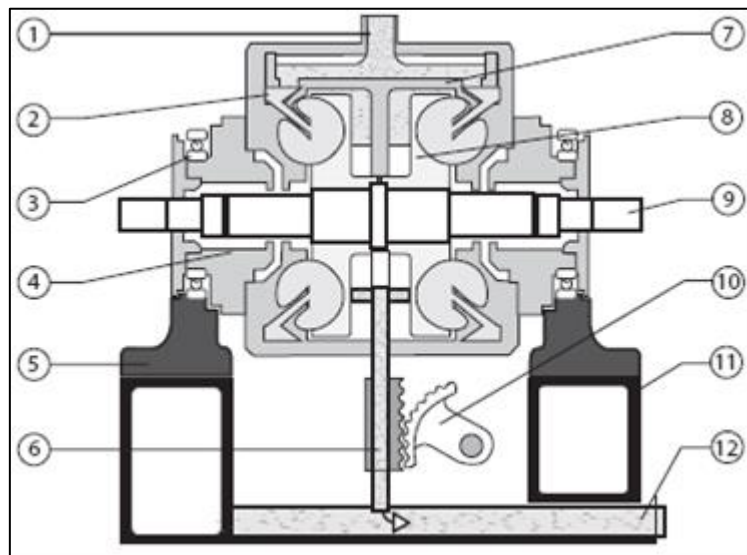
**Figura 8.** Esquema de freio dinamométrico (Martins, 2016).

Se um motor for testado em mais de um tipo de dinamômetro, os resultados podem fornecer dados diferentes, visto que as condições de testes variam. Por exemplo, se um motor é testado em um dinamômetro de bancada, a potência obtida será maior que a potência registrada em um dinamômetro de chassi (ou de rolo). Isto acontece porque nos testes em bancada, não são consideradas algumas perdas como o atrito entre o pneu e o solo e o consumo de potência por alguns acessórios acoplados ao motor.

### 2.6.1 Dinamômetro Hidráulico

Dinamômetros hidráulicos, Figura 9, são feitos com um elemento rotativo chamado de rotor (alguns utilizam múltiplos rotores) acoplados ao eixo principal. O elemento estacionário é chamado de estator. Ambos estator e rotor são equipados com conchas ou palhetas e a única ligação entre o rotor e o estator é a água que circula pelo dinamômetro. Curiosamente, a troca térmica hidrocínética acontece como um caminho toroidal onde a água transfere energia do rotor para o estator em uma troca constante (Bates e Hancock, 2008).

O efeito é transferir o momento do rotor para o estator e, assim, desenvolver um torque resistente à rotação do eixo, equilibrado por uma reação de torque igual e oposta na carcaça (Crolla, 2009).

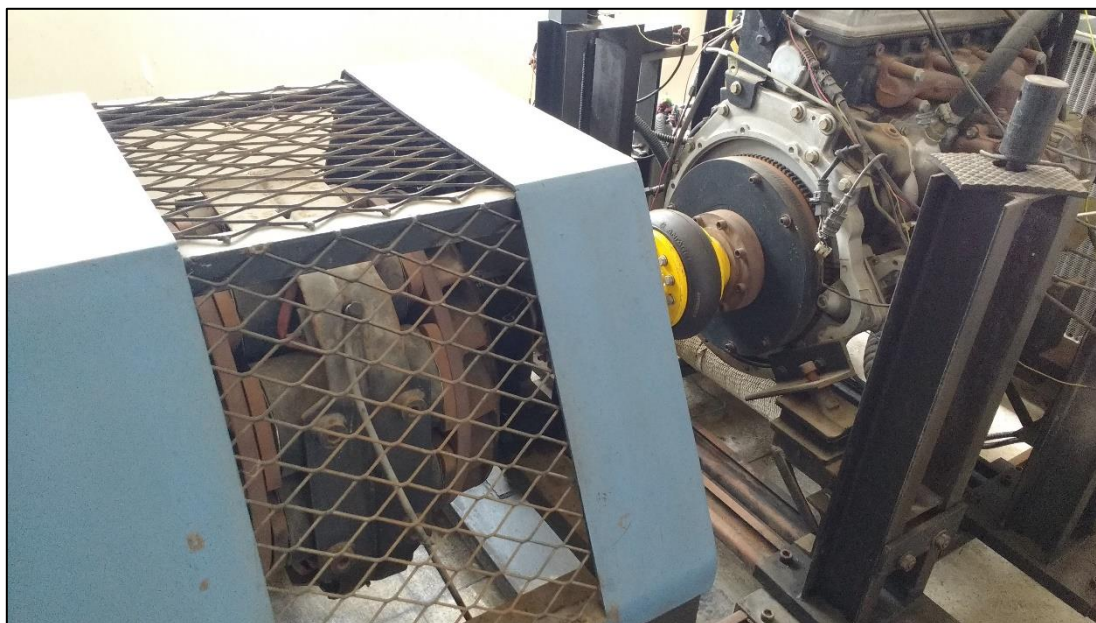


**Figura 9.** Vista em corte de um dinamômetro hidráulico (1) Entrada da água, (2) Duto de alimentação, (3) Mancal de balanço, (4) Mancal do rotor, (5) Suporte de montagem, (6) Saída de água, (7) Estator, (8) Rotor, (9) Eixo principal, (10) Engrenagem de ajuste da abertura da válvula de água (Brunetti, 2013).

### 2.6.2 Dinamômetro de Inércia

Este tipo de dinamômetro consiste em massas (cilindros de inércia) que são forçadas a girar através do acionamento do motor, que pode estar diretamente ligado ao dinamômetro (Figura 10) ou o veículo pode ser colocado com as rodas motrizes sobre os cilindros de inércia, também chamados de rolos (Figura 11). Neste caso, são medidas não só a inércia provocada pelo rolo, como também do sistema de transmissão e das rodas (Martins, 2016).

Ao fazer testes com um dinamômetro de inércia, são obtidos resultados mais realistas, visto que são considerados atritos presentes em situação de uso real.



**Figura 10.** Dinamômetro acoplado diretamente a um motor (Autora, 2018).



**Figura 11.** Veículo sobre dinamômetro de rolo (Autora, 2019).

## CAPÍTULO III

### 3. EXPERIMENTAÇÃO

#### 3.1 Introdução

O presente capítulo traz a apresentação dos equipamentos que foram utilizados nos testes, como o veículo, o opacímetro e o analisador de gases. Além disso, detalha os passos que foram seguidos durante a realização dos testes.

Os testes foram feitos em no dinamômetro de rolo Servitec Modelo 2020RB da oficina Rocket Performance, localizada na Avenida Barão de Mamanguape, 334 no bairro da Torre em João Pessoa/PB.

#### 3.2 Equipamentos

##### 3.2.1 Veículo e motor

Um veículo S10 LT da marca Chevrolet, ano de fabricação e modelo 2016 (Figura 12), foi utilizado para realizar os testes. Este veículo foi gentilmente cedido pela Garagem da UFPB e apresentava características apropriadas como motor de ignição por compressão, capacidade de transportar tanto cargas quanto passageiros, sistema de injeção eletrônica e moderna, além de porte adequado ao dinamômetro a ser utilizado.



**Figura 12.** Veículo Chevrolet S10 utilizado nos testes (Autora, 2019).



Os dados técnicos do motor turbinado da S10 são apresentados na Tabela 3. É necessário atentar-se ao fato de que os dados de torque e potência máximos presentes na Tabela 3 são medidos em dinamômetro de bancada com acelerador totalmente acionado. É medido o torque do motor em cada rotação e a potência é o resultado da multiplicação do torque pela rotação (Gazeta,2018). Neste tipo de medição, são desconsideradas as perdas da transmissão até as rodas, do funcionamento da bomba de água, do atrito dos pneus com o solo, entre outras. Por isso, os valores apresentados na Tabela 3 são superiores aos obtidos durante o teste no dinamômetro de rolo com diesel comum (seção 4.3).

<b>Tipo</b>	Longitudinal, na frente do eixo dianteiro
<b>Nº de cilindros</b>	4 (em linha)
<b>Cilindrada</b>	2768 cm <sup>3</sup>
<b>Taxa de compressão</b>	16,5:1
<b>Sequência de ignição</b>	1-3-4-2
<b>Potência</b>	200 CV (147 kw) a 3.600 rpm
<b>Torque</b>	500 Nm (51 mkg.f) a 2000 rpm
<b>Velocidade de marcha lenta</b>	740 ± 50 rpm
<b>Tipo de combustível</b>	Óleo diesel (capacidade nominal do tanque: 76L)

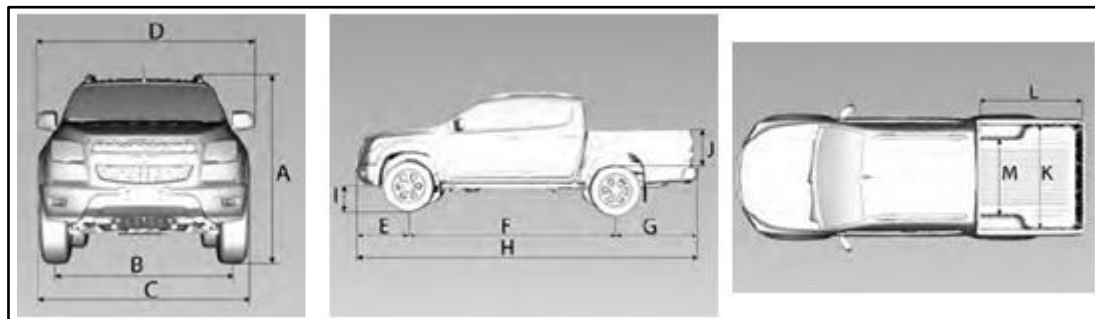
**Tabela 3.** Dados do motor turbinado da Chevrolet S10 ano/modelo 2016 (adaptado de Chevrolet, 2015).

Na Tabela 4 são apresentadas as relações de transmissão do câmbio automático da Chevrolet S10.

<b>Transmissão</b>	
<b>Marcha</b>	<b>Relação</b>
1ª marcha	4,06:1
2ª marcha	2,37:1
3ª marcha	1,55:1
4ª marcha	1,16:1
5ª marcha	0,85:1
6ª marcha	0,67:1
Marcha à ré	3,20:1
Relação de transmissão do diferencial	3,42:1

**Tabela 4.** Relações de transmissão da Chevrolet S10 ano/modelo 2016 (adaptado de Chevrolet, 2015).

A Figura 13 e a Tabela 5 abaixo mostram as principais dimensões externas do veículo e seus valores, respectivamente, com o objetivo de demonstrar suas proporções para fins comparativos e melhor compreensão.



**Figura 13.** Dimensões externas da Chevrolet S10 ano/modelo 2016 (adaptado de Chevrolet, 2015).

Designação	Dimensão
A	1.777 mm
B	1.570 mm
C	1.882 mm
D	2.132 mm
E	943 mm
F	3.096 mm
G	1.308 mm
H	5.347 mm
I	201 mm
J	466 mm
K	1.534 mm
L	1.484 mm
M	1.122 mm

**Tabela 5.** Valores das dimensões externas da Chevrolet S10 ano/modelo 2016 (adaptado de Chevrolet, 2015).

### 3.2.2 Bomba de opacidade digital

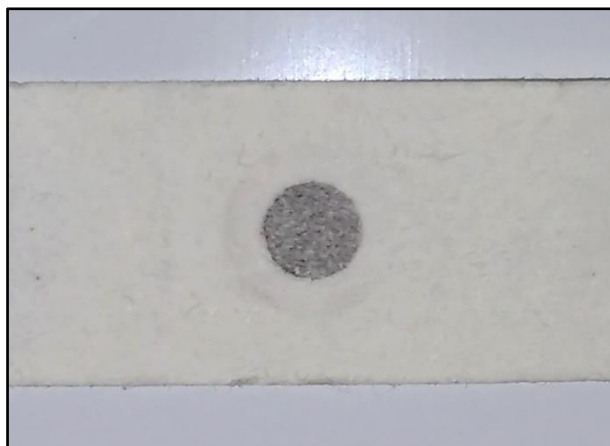
A bomba de opacidade digital, ou opacímetro, tem a função de determinar a concentração de fuligem presente em gases de escapamento de sistema de combustão. Com as informações obtidas, é possível avaliar se estes sistemas se encontram dentro dos limites permitidos.

O opacímetro utilizado neste trabalho foi o modelo 308 da marca alemã Testo, mostrado na Figura 14.



**Figura 14.** Opacímetro Testo 308 (1) Papel filtro, (2) Tubo da sonda, (3) Acesso ao papel filtro, (4) Tampa para manutenção, (5) Reservatório de condensado, (6) Abertura para saída da condensação, (7) Saída dos gases, (8) Tela, (9) Botões de função, (10) Botão liga/desliga (Autora, 2019).

Este instrumento tem um sensor fotodiodo, responsável por converter o sinal luminoso em um sinal elétrico que pode ser processado por seu circuito eletrônico e impresso como uma mancha de fuligem circular acinzentada, exemplificada na Figura 15. Sua resolução é de 1 cf, exatidão de  $\pm 0,2$  cf e volume das amostras de medição de 1,63  $\pm 0,1$  litro de referência (Testo, 2012).



**Figura 15.** Mancha de fuligem impressa em papel filtro (Autora, 2019).

Para utilizar este opacímetro, é necessário iniciar com um teste de estanqueidade aspirando ar por até 30 segundos com o tubo da sonda fechado. Caso o instrumento esteja estanque, antes do final do teste a mensagem “Test OK” é exibida. Em seguida, deve-se pressionar “End”, fazer a configuração para o teste e selecionar se o combustível utilizado é ou não derivado de petróleo. Por último, deve-se verificar se o reservatório de condensado, o filtro de partículas e a tampa para medição estão como indicados pelo manual. Após toda preparação, a ponta do tudo da sonda pode ser colocada no ponto onde a temperatura dos gases de combustão é mais elevada e pressionar “Start”, dando início a medição. O painel indica o tempo de medição decorrido e, ao ser concluída, uma mancha de fuligem é impressa no papel filtro e o índice de opacidade registrado é exibido na tela (Testo, 2012).

### **3.2.3 Analisador de Gases**

O analisador de gases é responsável por captar um certo fluxo de gases de escape de um veículo e analisar sua composição informando a concentração dos gases que foram selecionados pelo usuário.

Neste trabalho, foi utilizado um analisador de gases da marca MRU, modelo OPTMA 7, mostrado na Figura 16, que possibilita selecionar o tipo de combustível, as condições de realização dos testes, os gases que se deseja avaliar e limites para as medições.

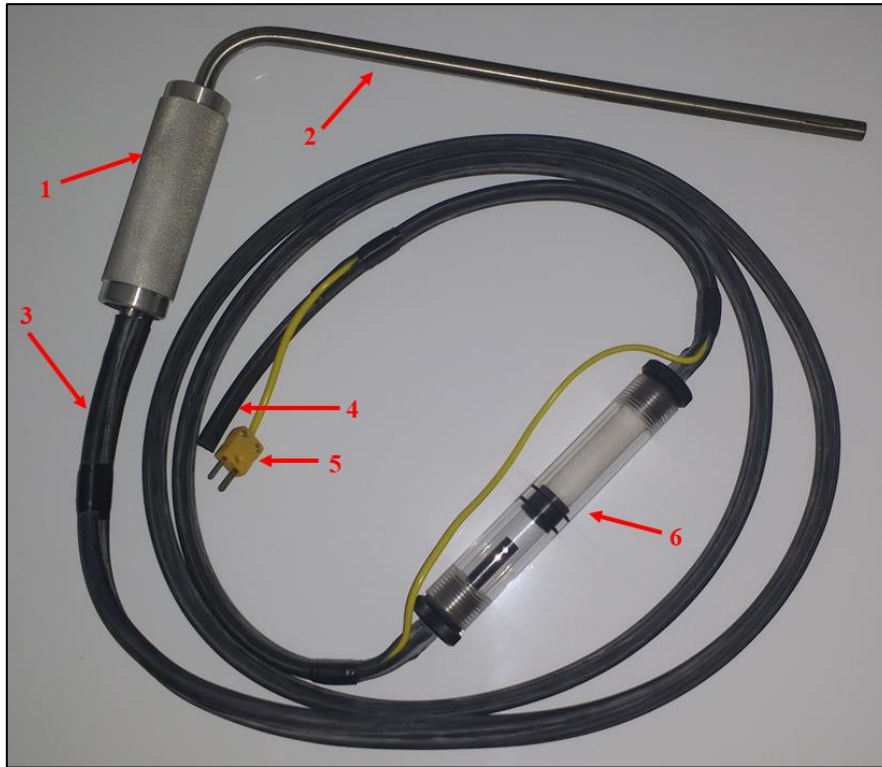




**Figura 16.** Analisador de gases MRU OPTMA 7 (1) Tela, (2) Teclas de função, (3) Tecla menu, (4) Tecla impressão, (5) Liga/desliga, (6) Separador de condensação, (7) Conector de termopar, (8) Conectores de pressão, (9) Conector de amostragem (Autora, 2019).

Para iniciar um teste, é necessário primeiro fazer o processo de zeragem do equipamento. Em seguida, seleciona-se um programa de análise pré-definido, o combustível e acopla-se a sonda e o termopar no equipamento. Após essas etapas, inicia-se a medição inserindo a sonda de amostragem, que pode ser vista na Figura 17, no cano de escape do veículo e aguarda-se a conclusão da medição. Durante o teste, os gases saem do analisador por aberturas na parte traseira que não devem ficar obstruídas em momento algum.

Ao concluir um teste, é necessário fazer a purga dos gases remanescentes.



**Figura 17.** Sonda (1) Manípulo, (2) Sonda de amostragem, (3) Mangueira de amostragem, (4) Conector de amostragem, (5) Conector de termopar, (6) Porta filtros (Autora, 2019).

### **3.2.4 Dinamômetro Inercial de Rolo**

Um dinamômetro de rolo da marca brasileira Servitec, modelo 2020RB mostrado na Figura 18, foi utilizado durante os testes e é um dos mais modernos encontrados atualmente. Este equipamento é alimentado por uma tensão de 220V, suporta veículos com potência de até 1400hp (1419,418cv) e velocidade máxima de 300km/h (Servitec, 2019).



**Figura 18.** Dinamômetro Servitec Modelo 2020RB (Autora, 2019).

Sua estrutura é reforçada e composta por um rolo de 18 polegadas com balanceamento de alta precisão, painel de controle externo, pendente com botões de controle que possibilita o acionamento de dentro do veículo, freio eletromagnético, totalmente sem atrito, que permite realizar o controle do veículo através dos parâmetros de rotação, velocidade, tempo ou percentual de frenagem, também dispensa a utilização do freio do veículo para efetuar paradas rápidas e célula de carga, permitindo realizar medições de torque e potência em tempo real (Servitec, 2019).

Além disso, possui estação atmosférica própria com medições automáticas (pressão barométrica, temperatura e umidade relativa do ar), eletrônica dedicada para aferição dos dados e comunicação com o computador, medição por sensores independentes (por exemplo: MAP, TPS, temperatura, etc.). Todos os dados coletados são apresentados em tempo real através do *software* WinSSDino (Servitec, 2019).

### **3.3 Descrição dos Testes Realizados**

Durante os testes foram avaliados torque e potência máximos, composição e opacidade dos gases de escapamento.

Para cada um dos parâmetros analisados foram realizados três testes. No primeiro teste, utilizou-se diesel comum, vendido atualmente nos postos de combustível e que contém 10% de biodiesel. No segundo teste, utilizou-se uma mistura de 15% de biodiesel no diesel de petróleo puro (obtido na distribuidora antes da adição de biodiesel), com o

objetivo de analisar o efeito desta porcentagem de biodiesel que deverá estar presente no diesel comum até o ano de 2023, de acordo com a Resolução 16/2018 do CNPE.

O último teste foi feito utilizando 100% de biodiesel para analisar os efeitos do uso deste combustível puro nos parâmetros que foram analisados.

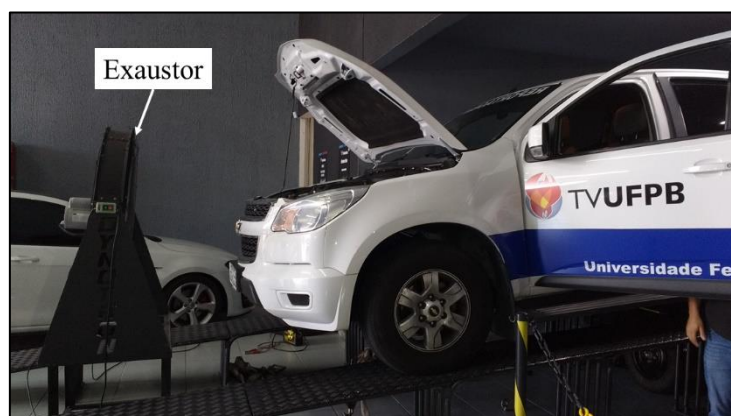
Para realização dos testes não foi necessário fazer nenhuma alteração no motor da Chevrolet S10, no seu sistema de alimentação de combustível ou de ar, tanque de combustível ou qualquer outro sistema do veículo.

As etapas de realização dos testes foram as seguintes: primeiro, foi necessário fixar o veículo em cima da plataforma do dinamômetro através de correias (Figura 19).



**Figura 19.** Fixação do veículo na base do dinamômetro (Autora, 2019).

Depois, ligaram-se os exaustores tanto para arrefecimento do veículo quanto para circulação de ar no ambiente em que estavam acontecendo dos testes (Figura 20).



**Figura 20.** Exaustor para arrefecimento do veículo (Autora, 2019).

Após verificar que o veículo já estava fixado com segurança, iniciou-se o teste no dinamômetro para colher dados de potência máxima e torque máximo com o combustível diesel comum (B10).

Em seguida foi iniciado o teste para colher os dados de opacidade e análise da composição dos gases de exaustão. Para isso, colocou-se o veículo em marcha lenta e, sem carga, fez-se aferição desses dois parâmetros. A Figura 21 mostra a posição em que foram colocados tanto o opacímetro quanto o analisador de gases no escapamento do veículo em todos os testes.

Na próxima etapa foi feita a medição de opacidade e análise da composição dos gases de exaustão em rotação de torque máximo. Esse valor de rotação foi obtido quando foram medidos o torque máximo e a potência máxima anteriormente com o B10.



**Figura 21.** Exemplo da posição do analisador e do opacímetro (Autora, 2019).

Por último, fez-se a medição da opacidade e análise da composição dos gases de exaustão para o combustível B10 na rotação de potência máxima alcançada inicialmente.

Devido ao alto valor de rotação necessário para alcançar a potência e torque máximos foi necessário fazer um intervalo entre as medidas de opacidade e análise de gases de uma faixa de rotação para outra para que houvesse tempo dos equipamentos

(dinamômetro e opacímetro) resfriarem e retornarem à temperatura de funcionamento adequada. Este ciclo de testes foi repetido para cada combustível que se desejava analisar.

Em resumo, fez-se a medição em cada combustível de torque e potência máximos, em seguida mediu-se a opacidade, fez-se a análise dos gases em marcha lenta, na rotação de torque máximo e na rotação de potência máxima. Sendo assim, essas etapas foram repetidas três vezes: uma para B10, uma para B15 e uma para B100. Para cada combustível e cada faixa de rotação avaliada, fez-se a medição de opacidade e análise de gases durante um minuto.

Cada medição dos parâmetros dos gases de escape foi feita após a estabilização da rotação em que se desejava colher os dados. Todos os testes em marcha lenta foram feitos sem carga, já para os testes feitos nas rotações de torques máximos manteve-se um valor constante de carga aplicado para cada combustível. O mesmo foi aconteceu nos testes nas rotações de potências máximas.



## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 4.1 Introdução

O capítulo 4 traz os resultados obtidos e suas análises após a realização dos testes com o veículo Chevrolet S10 no dinamômetro de rolo Servitec 2020RB utilizando as proporções de biodiesel propostas neste trabalho. Durante as medições relacionadas aos gases de exaustão em rotação de potência máxima, a célula de carga foi mantida em 0,7 kgf.m. Já em rotação de torque máximo, o valor ficou entre 0,6 e 0,7 kgf.m.

A Tabela 6 mostra os valores de rotação (RPM) obtidos para marcha lenta, torque máximo e potência máxima em cada combustível testado.

COMBUSTÍVEL	Condição	Rotação
<b>B10</b>	Marcha lenta	740 ± 50 rpm
	Torque máx.	2220 rpm
	Potência máx.	3500 rpm
<b>B15</b>	Marcha lenta	740 ± 50 rpm
	Torque máx.	2320 rpm
	Potência máx.	3480 rpm
<b>B100</b>	Marcha lenta	740 ± 50 rpm
	Torque máx.	2350 rpm
	Potência máx.	3480 rpm

**Tabela 6.** Rotações para cada condição analisada (Autora, 2019).

#### 4.2 Gases de Exaustão

##### 4.2.1 Opacidade

A Tabela 7 mostra os valores de índice de opacidade obtidos em cada teste. A gama de medição do aparelho Testo 308 varia de 0 a 6 e valores acima deste indicam que a opacidade está fora do limite estabelecido pelo norma do seu país de origem, Alemanha. No caso do Brasil, em que o Proconve P7 está em vigência e permite valores superiores, não há erro em encontrar resultados maiores que 6.

OPACIDADE			
CONDIÇÃO	B10	B15	B100
Marcha lenta	5,2	4,9	5,7
Torque máx.	7,8	6,6	6,3
Potência máx.	7,3	6,9	6,5

**Tabela 7.** Resultados de opacidade dos gases de escape (Autora, 2019).

Ao analisar os valores da Tabela 7, nota-se que o biodiesel B10, atual diesel comum, apresentou valores piores que os demais em duas condições em que o motor é mais exigido e que podem ocorrer com certa frequência, especialmente quando se trata de veículos que transportam um grande número de passageiros ou cargas. Em contrapartida, o B100 se mostrou muito mais eficiente nessas situações, apresentando, com exceção da condição de marcha lenta, valores mais baixos de opacidade que o B10 e o B15.

A avaliação da opacidade do B100 apresentou como melhor resultado uma redução de 19,23% se comparada ao B10 na condição de torque máximo, o que indica que menos material particulado está presente nos gases de escape quando o B100 é usado.

#### 4.2.2. Análise da Composição Gases

As Tabelas 8 e 9 mostram os resultados adquiridos para a concentração de CO<sub>2</sub> e de NO<sub>x</sub> nos gases de escape.

CO <sub>2</sub> (%)			
CONDIÇÃO	B10	B15	B100
Marcha lenta	0,89	1,24	0,82
Torque máx.	7,49	7,41	7,47
Potência máx.	2,71	3,05	3,8

**Tabela 8.** Percentual de CO<sub>2</sub> presente nos gases de escape (Autora, 2019).

Em relação às emissões de CO<sub>2</sub> os testes mostram que o B100 alcançou resultados positivos apenas na situação de marcha lenta, enquanto que o B15 se mostrou melhor em torque máximo e o B10 em potência máxima. Porém, é necessário ressaltar que o cultivo de fontes vegetais para a produção de biodiesel absorve parte deste CO<sub>2</sub> ao realizar o processo de fotossíntese durante seu crescimento, reduzindo o impacto da emissão deste gás em particular.



NO (ppm)			
CONDIÇÃO	B10	B15	B100
Marcha lenta	126	133	109
Torque máx.	622	590	180
Potência máx.	260	217	235
NO <sub>2</sub> (ppm)			
CONDIÇÃO	B10	B15	B100
Marcha lenta	34	23	19
Torque máx.	238	291	49
Potência máx.	76	116	140
NO <sub>x</sub> (ppm)			
CONDIÇÃO	B10	B15	B100
Marcha lenta	160	156	128
Torque máx.	860	881	229
Potência máx.	336	333	375

**Tabela 9.** Concentração de NO, NO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> nos gases de escape (Autora, 2019).

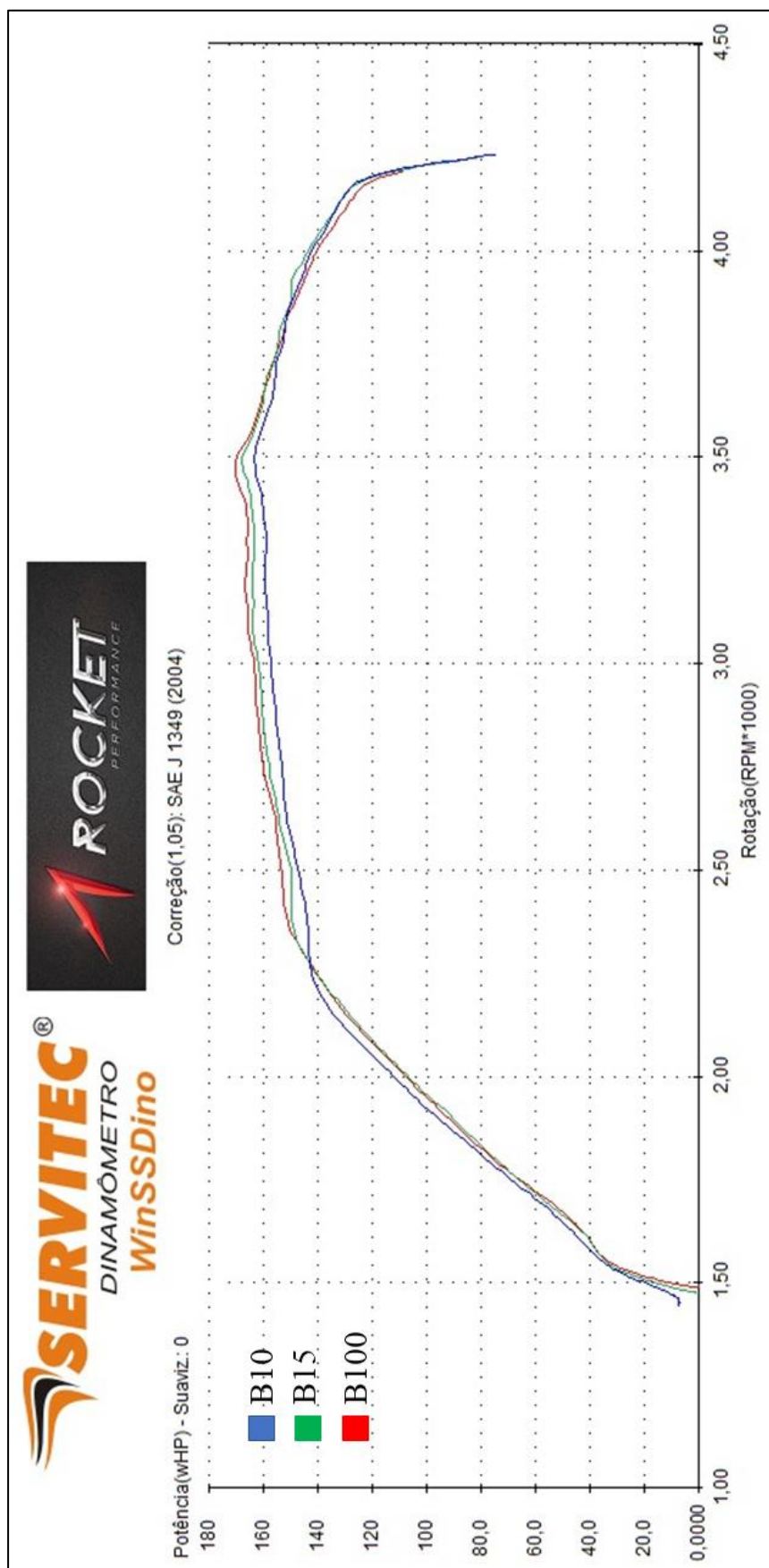
A Tabela 9 mostra que nos testes o B100 foi possível obter resultados positivos em praticamente todas as condições. De acordo com Demirbas (2008), os NO<sub>x</sub> formam oxidantes como o ozônio (O<sub>3</sub>), que provoca irritação nos olhos e no sistema respiratório e constituem o smog, névoa de poluição que dificulta a visibilidade, contribuem para o efeito estufa e para a chuva ácida, sendo sua redução um fator importante a favor do biodiesel.

### 4.3 Desempenho

Os testes de desempenho realizados com o veículo Chevrolet S10, seguiram a norma SAE J1349 que certifica que os valores da potência e do torque fornecidos são verdadeiros (SAE, 2019).

#### 4.3.1 Potência Máxima

A Figura 22 mostra o gráfico de potência (whp – potência na roda) por rotação dos três combustíveis analisados.



**Figura 22.** Curvas de potência para B10, B15 e B100 (cedido por Rocket Performance, 2019).

Pelo gráfico, é possível ver que o B100 apresentou ligeira vantagem relação aos demais. A Tabela 10 apresenta os valores máximos obtidos para as potências e as condições em que os testes foram realizados.

<b>Combustível</b>	<b>Pot. máx.</b>	<b>Rotação</b>	<b>Pressão</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Umidade relativa</b>
B10	163,21	3500 rpm	100 kPa	34,7 °C	44,40%
B15	167,91	3480 rpm	99,9 kPa	36,3 °C	39,20%
B100	170,53	3480 rpm	99,9 kPa	36,1 °C	42,80%

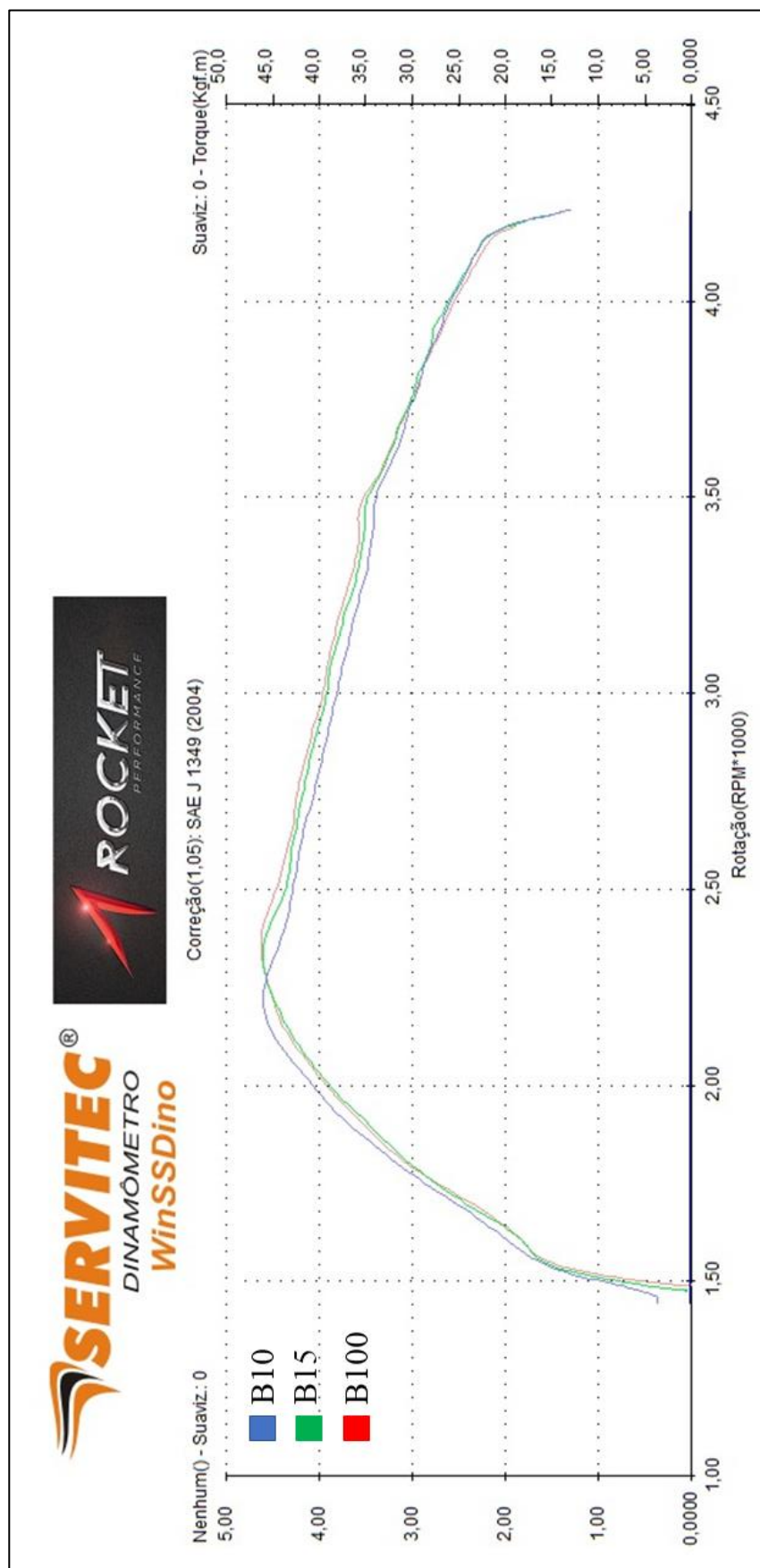
**Tabela 10.** Resultados de potência máxima para B10, B15 e B100 (Autora, 2019).

#### **4.3.2 Torque Máximo**

A Figura 23 mostra o gráfico de torque por rotação dos três combustíveis analisados. A Tabela 11 apresenta os valores máximos obtidos para os torques e as condições em que os testes foram realizados.

<b>Combustível</b>	<b>Torque máx.</b>	<b>Rotação</b>	<b>Pressão</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Umidade relativa</b>
B10	46,04 kgf.m	2220 rpm	100 kPa	34,7 °C	44,40%
B15	46,1 kgf.m	2320 rpm	99,9 kPa	36,3 °C	39,20%
B100	46,26 kgf.m	2350 rpm	99,9 kPa	36,1 °C	42,80%

**Tabela 11.** Resultados de torque máximo para B10, B15 e B100 (Autora, 2019).



**Figura 23.** Curvas de potência para B10, B15 e B100 (cedido por Rocket Performance, 2019).

## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSÕES

Após a apresentação dos resultados dos testes no capítulo anterior e analisando todo o esforço empregado na realização deste trabalho, é possível estabelecer as seguintes conclusões:

- Apesar de trabalhos empíricos proporcionarem grande aprendizado, possibilidade de atuação prática e resultados mais próximos da realidade, demandam grande dedicação tanto do aluno quanto do orientador;
- O uso do biodiesel B15 ou B100 em um veículo com configuração original foi totalmente possível, não havendo necessidade alguma de fazer qualquer adaptação;
- O veículo que foi abastecido com B100 não apresentou nenhum tipo de falha durante ou após os testes, seja mecânica ou eletrônica;
- Os resultados requeridos puderam ser obtidos em apenas um dia de testes;
- O biodiesel B100 mostrou-se uma opção viável para substituição por completo do óleo diesel comum, visto que apresentou resultados positivos tanto em emissões quanto em desempenho. Com exceção das emissões de CO<sub>2</sub> e poucos valores de NO<sub>x</sub>, o B100 trouxe redução na concentração de NO<sub>x</sub> para todos os valores de rotação de marcha lenta e torque máximo, redução no índice de opacidade indicando menor produção de particulados, melhora de 7 whp na potência máxima e se manteve na faixa de torque máximo dos demais combustíveis ainda com pequena vantagem.
- Com estes resultados, fica evidenciado que o percentual de biodiesel poderá ser aumentado para 15% até 2023, como prevê a Resolução 16/2018 do CNPE, podendo esta concentração ser ainda ampliada sem prejuízos no desempenho de veículos.

## **SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Visando ampliar os resultados obtidos neste trabalho e a continuidade do estudo do biodiesel para aplicações práticas e que atendam às necessidades da comunidade, são sugeridos como temas para trabalhos futuros:

- 1 - Testar o uso de biodiesel por um período prolongado e analisar os efeitos nos componentes do motor;
- 2 - Analisar a possibilidade de variação de ponto de ignição e os efeitos do uso do biodiesel B100 em torque e potência máximos, emissões e opacidade para refinar os resultados obtidos neste trabalho;
- 3 - Avaliar o consumo de biodiesel B100 no uso regular em veículos com motores de ignição por compressão
- 4 - Avaliar o desempenho de caminhões que tracionam grandes carretas com o uso de biodiesel B100 e suas emissões;
- 5 - Analisar a viabilidade do uso de biodiesel como combustível para geradores de energia elétrica.

## REFERÊNCIAS

ANP, Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2019, Dados estatísticos. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/dados-estatisticos>

Brunetti, F., Motores de Combustão Interna - volume I, 1ª ed., Edgard Blucher, São Paulo, 2013.

Brunetti, F., Motores de Combustão Interna - volume II, 1ª ed., Edgard Blucher, São Paulo, 2013.

Chevrolet, 2015, Manual do proprietário – Chevrolet S10, Brasil.

Confor, Analisador OPTMA 7 – Manual de instruções e operação, São Paulo, 2013.

Crolla, D. A., Automotive Engineering - Powertrain, Chassis System and Vehicle, 1ª ed., Burlington, 2009.

Demirbas, A., Biodiesel: a realistic fuel alternative for diesel engines, Springer-Verlag, Londres, 2008.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética, Balanço Energético Nacional - Relatório Síntese Ano base 2017, Rio de Janeiro, 2018.

Gutiérrez, R. H., 2011, “Estudo de Desempenho de um Motor Diesel Ottolizado Funcionando com Gás Natural Através de Simulação Termodinâmica e Análise Experimental”, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dissertação (Mestrado), Rio de Janeiro.

Martins, J., Motores de Combustão Interna, 5ª ed., Publindústria, Porto, 2016.

Mate, N. R., Dhande D. Y., Design and development of two wheeler retarder type dynamometer portable test platform, International Journal of Engineering Research & Technology, Índia, 2014.

MMA, Ministério de Meio Ambiente, 2018, Conama limita emissão de poluentes. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/informma/item/15253-conama-limita-emissão-de-poluentes-para-ônibus-e-caminhão.html>

Mollenhauer K., Tschoeke H., Handbook of Diesel Engines, Springer, Alemanha, 2010.

Gazeta, 2018, Torque e potência devem ser avaliados de acordo com o tipo de veículo. Disponível em: <https://www.gazetaonline.com.br/noticias/veiculos/2018/06/torque-e-potencia-devem-ser-avaliados-de-acordo-com-o-tipo-de-veiculo-1014136033.html>

Santos, L. B., 2015, “Análise e Desenvolvimento de Técnica e Controle Eletrônico na Utilização Conjunta de Biodiesel – GNV em Motores do Ciclo Diesel”, Universidade Federal da Paraíba, Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Paraíba.

Petrobrás – Óleo diesel. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/pt/produtos-e-servicos/produtos/automotivos/oleo-diesel/>

SAE, Society of Automotive Engineers, About SAE J1349® Certified Power, 2019 Disponível em: <https://www.sae.org/standards/development/about-saej1349-certified-power/>

SEEG, Instituto de Energia e Meio Ambiente, Emissões dos setores de energia, processos industriais e uso de produtos, 2018.

Servitec, Dinamômetro automotivo Servitec mod 2020rb (reboque), 2018. Disponível em: <http://www.servitecdinamometro.com.br/categoria/para-carros/2020rb-reboque-lancamento>

Testo, Testo 208 – Instrumento de medição da opacidade - Manual de Instruções, Brasil, 2012.

Wang, Y., Ou, S., Liu, P., Zhang, Z. 2007. Preparation of biodiesel from waste cooking oil via two-step catalyzed process. Energy Convers Mgmt 48:184–188.

Zuninga, A. D. G., Revisão: propriedades físico-químicas do biodiesel, UFPR, Curitiba, 2011.